

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.05.004

面向航空应用的电镀 Ni-Co-B 合金工艺研究

王心蕊¹, 王朝琳², 董德蕊¹, 毛鹏¹, 宋斌², 戴晓亮², 李若鹏¹, 杨培霞¹

(1. 哈尔滨工业大学 化工与化学学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中国航空工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨, 150066)

摘要: 以二甲胺基甲硼烷(DMAB)为硼源和还原剂, 在硫酸盐溶液中电镀 Ni-Co-B 合金, 并通过镀层外观、硬度和沉积速度等指标优化镀液组成及工艺参数。利用扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)分析镀层表面形貌和晶体结构, 通过中性盐雾试验、Tafel 曲线测试综合评估镀层耐蚀性。经验证, 电镀参数设置为硫酸镍 120 g/L、硫酸钴 12 g/L、二甲胺基甲硼烷 4 g/L、氯化镍 40 g/L、硼酸 35 g/L、复配添加剂 2 g/L, 温度 50 °C 及电流密度 7 A·dm⁻² 时, 可获得外观光亮结晶细腻的合金镀层, 镀层沉积速率 80~90 μm·h⁻¹、硬度 740~800 HV, 电流效率高达 95%。合金镀层经过 250 °C 热处理后, 硬度可达到 1 000 HV, 与 Cr⁶⁺ 硬铬镀层相当, 镀层耐蚀性也有所提升。结果表明: Ni-Co-B 合金镀层具有高硬度、低粗糙度和良好耐蚀性, 且电镀过程中电流效率高、清洁环保, 有望取代 Cr⁶⁺ 硬铬在航空制造领域得到应用。

关键词: Ni-Co-B 合金; 耐蚀性; 沉积速度; 硬铬

中图分类号: TQ153.2; TG17 **文献标志码:** A

Process research on electroplating Ni-Co-B alloy for aerospace applications

WANG Xinrui¹, WANG Zhaolin², DONG Derui¹, MAO Peng¹, SONG Bin², DAI Xiaoliang²,
LI Ruopeng¹, YANG Peixia¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Harbin Aircraft Industry Group Co., Ltd. of Aviation Industry Corporation of China, Harbin 150066, China)

Abstract: Using dimethylaminomethylborane (DMAB) as both boron source and reducing agent, Ni-Co-B alloy was electroplated in a sulfate-based solution. Optimal bath composition and process parameters were determined by comparing coating appearance, hardness, deposition rate and cathodic current efficiency. Surface morphology and crystal structure of the deposits were analyzed using SEM and XRD. Corrosion resistance of Ni-Co-B alloy deposits was comprehensively evaluated through saltwater immersion and Tafel current rate tests. It has been verified that under the plating parameters of nickel sulfate 120 g/L, cobalt sulfate 12 g/L, dimethylamine borane 4 g/L, nickel chloride 40 g/L, boric acid 35 g/L, composite additive 2 g/L, temperature 50 °C, and current density 7 A·dm⁻², an alloy coating with bright, smooth and fine-grained appearance can be obtained. The coating deposition rate ranged from 80~90 μm·h⁻¹, the hardness was between 740 and 800 HV, and the current efficiency exceeded as high as 95%. After heat treatment at 250 °C, the alloy coating achieves a hardness of 1 000 HV, comparable to that of Cr⁶⁺ hard chrome plating, with enhanced corrosion resistance. Results demonstrate that Ni-Co-B alloy

收稿日期: 2026-01-29 修回日期: 2026-03-09

作者简介: 王心蕊(2002—), 女, 硕士生, 研究方向为表面处理, e-mail: hgybxw@163.com

通信作者: 杨培霞(1970—), 女, 博士, 教授, 研究方向为电催化、表面处理, e-mail: yangpeixia@hit.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(22278097)

引用信息: 王心蕊, 王朝琳, 董德蕊, 等. 面向航空应用的电镀 Ni-Co-B 合金工艺研究[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(5): 27-33, 44. WANG Xinrui, WANG Zhaolin, DONG Derui, et al. Process research on electroplating Ni-Co-B alloy for aerospace applications[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(5): 27-33, 44.

coatings exhibit high hardness, low roughness and excellent corrosion resistance. The plating technology features high electroplating efficiency and environmental friendliness, making it a promising candidate to replace Cr^{6+} hard chrome plating in aerospace manufacturing applications.

Keywords: Ni-Co-B alloy; corrosion resistance; deposition rate; hard chrome

Cr^{6+} 硬铬镀层具有硬度高、耐磨性好、摩擦系数低且稳定性好的特点,被广泛应用于航空制造领域^[1-2]。飞行器起落架活塞杆、发动机压气机叶片、液压传动件等高承载、强摩擦运动部件多采用 Cr^{6+} 硬铬镀层进行防护^[3],此类零件的表面处理直接关系到飞行器在极端载荷、高速摩擦及复杂腐蚀介质环境下的服役安全与寿命。随着近年表面处理技术的发展,喷涂碳化钨技术被逐渐引入,然而 Cr^{6+} 硬铬仍是主要防护方法之一^[4]。必须指出, Cr^{6+} 镀液中含有高浓度铬酸酐,在镀覆过程中有浓重的铬雾逸出,是污染最严重、最难处理的电镀污染源之一。因此,开发一种兼具高性能、高可靠性与环境友好性的代 Cr^{6+} 镀铬技术,已成为航空表面工程领域的迫切需求^[5]。

目前,代硬铬技术主要有 Cr^{3+} 镀铬、复合电镀和合金电镀等3类^[6]。 Cr^{3+} 镀铬溶液中铬离子浓度约为 Cr^{6+} 镀液中浓度的十分之一,该方法电流效率高、分散能力好,但对杂质敏感程度较高,镀层光泽性和耐蚀性差、硬度低^[7-8]。复合电镀一般为Ni-P- Si_3N_4 、Ni-P-SiC等复合镀层^[9-10],可以明显改善镀层的硬度和耐磨性,但复合电镀工艺复杂且随着镀层增厚,微粒的共沉积量和分布均匀性难控制,通常较难获得厚且均匀的复合镀层^[11-12]。合金代硬铬镀层根据合金沉积特点,可分为电镀Ni-Co、Ni-W等合金及其三(多)元合金^[13-16],以及化学镀 Ni-P、Ni-B等合金及其三(多)元合金^[17-19],其中电镀 Ni-Co合金有良好外观、耐蚀性、耐磨性,但由于硬度较低,其较少用于硬铬镀层的替代^[20]。研究发现,在合金镀层中引入C、B、P或W等元素形成的三元及多元合金镀层^[21-23],可改善镀层性能并提高硬度。通过电沉积方法制备的Ni-Co-B合金镀层呈非晶态或部分非晶态^[24],镀层光亮、硬度高、耐磨性和耐蚀性好,非晶态组织还可有效抑制微观裂纹的萌生和扩展并降低疲劳磨损,是解决 Cr^{6+} 镀铬重污染的途径之一,然而其研究多聚焦于材料的基础力学与耐蚀性能验证。鉴于航空制造领域对关键部件表面防护层极端工况下的长期环境耐受性及可靠性的严苛要求,现有研究在面向工程应用的性能评价体系上仍存在不足。

立足航空制造领域的应用需求,本文开发制备了一种具有高硬度、低粗糙度、良好耐磨性和耐蚀性的Ni-Co-B合金镀层,并通过镀层结构及其性能测试验证其在 Cr^{6+} 镀硬铬中的有效性,为 Cr^{6+} 硬铬工艺的替代提供参考。

1 实验

1.1 材料试剂及设备

试件材料为45#钢(退火, GB/T 13237),尺寸为100 mm×25 mm×1 mm,粗糙度 R_a 为0.8 μm 。其余试验用材料见下表1。

表1 试验用主要材料

Tab.1 Primary materials in the experiment

材料及设备名称	厂家、标准及型号
化学药品	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
镍阳极	GB/T 2056
热处理设备	天津市天骄公司生产的 SK2-2-10 型管式炉

1.2 镀层制备

电镀Ni-Co-B 金主要工艺流程:除油→水洗→酸洗→水洗→电镀→水洗→吹干→热处理。Ni-Co-B 镀液组成为:60~300 g/L 硫酸镍($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$);12 g/L 硫酸钴($\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$);10~60 g/L 氯化镍($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$);15~60 g/L 硼酸(H_3BO_3);0~10 g/L 二甲胺基甲硼烷($\text{C}_2\text{H}_6\text{NHBH}_3$);1~4 g/L 复配添加剂。主要工艺参数:电流密度7 $\text{A} \cdot \text{dm}^{-2}$;电镀时间30 min;温度50 $^\circ\text{C}$;pH值4.0。镀层热处理步骤:将试件置于管式炉中,升温速度为10 $^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$,250 $^\circ\text{C}$ 恒温1 h,自然冷却至室温后取出。加热及保温过程全程通入氩气。

1.3 镀层性能测试

镀层表面形貌和结构:通过扫描电子显微镜(Quanta 200FEG,美国)观察镀层表面微观形貌;通过X射线衍射仪(D/Max-rB,日本)分析镀层晶型和镀层晶粒择优取向。通过激光共聚焦显微镜(Olympus,日本)观察镀层宏观形貌,获取粗糙度参数。

硬度测试:用 HV-1000A 型显微硬度计对镀层硬度进行测定。应用载荷为30 g,持续加载时间为1 s。待测镀层厚度大于20 μm ,选取镀层表面5个点进行测试,平均值作为硬度测试结果。

镀层耐蚀性测试:①中性盐雾试验。质量分数为3.5%、pH值范围为6.7~7.2的NaCl溶液通过喷雾装置持续进行喷雾,箱内温度为50 $^{\circ}\text{C}$;②Tafel曲线测试。采用三电极进行Tafel曲线测试,以镀层为工作电极,铂电极为对电极,饱和甘汞电极为参比电极。在pH值为7.0的3.5%氯化钠溶液中进行测试。扫描范围为-0.7~-0.25 V,扫描速度为1 mV/s,从-0.7 V开始正向扫描。

1.4 镀液性能测试

镀层厚度及沉积速度采用称重法进行计算,公式为:

$$d = \frac{m_2 - m_1}{\rho \times S} \quad (1)$$

$$v = \frac{m_2 - m_1}{\rho \times S \times t} \quad (2)$$

式中, d 为镀层厚度, μm ; v 为镀层沉积速度, $\mu\text{m}/\text{h}$; m_1 、 m_2 为镀层电镀前后质量,g; ρ 为镀层密度,因镀层中Ni、Co含量不确定,Ni含量一般较多,而Ni、Co密度相差不大,故 ρ 按照Ni密度计算,为8.9 g/cm^3 ; S 为镀层面积, cm^2 ; t 为电镀时间,h。

阴极电流效率:采用称重法进行计算,公式为:

$$\eta = \frac{m_2 - m_1}{I \times t \times K} \times 100\% \quad (3)$$

式中, η 为阴极电流效率; m_1 、 m_2 为镀层电镀前后质量,g; I 为电流,A,即电流密度与镀层施镀面积乘积 $D_k \times S$; t 为电镀时间,h; K 为电化当量,因镀层中Ni、Co含量不确定,而Ni、Co电化当量相差不大,故以Ni电化当量作为合金电化当量,即 $K=1.095 \text{ g} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 镀液组成及参数对镀层性能影响

2.1.1 二甲胺基甲硼烷浓度对镀层硬度及镀液性能影响

二甲胺基甲硼烷作为硼源和还原剂,使电沉积过程伴随着化学沉积作用,镀液中的镍离子还原成金属镍并沉积到金属基体表面。一般认为在低硼镀层中,硼以过饱和态固溶在镍的细小晶粒中,而高

硼镀层则为非晶态组织^[25]。由于非晶态镀层具有组织结构的均一性,所以表现出较优异的硬度、耐蚀性等性能。提高二甲胺基甲硼烷浓度可以提升镀层沉积速度,但其浓度过高会导致镀液分解加快,增加镀液成本。因此,固定硫酸镍120 g/L ,硫酸钴12 g/L ,氯化镍40 g/L ,硼酸35 g/L 及复配添加剂2 g/L ;温度50 $^{\circ}\text{C}$,电流密度7 $\text{A} \cdot \text{dm}^{-2}$,电镀时间30 min,分别测试二甲胺基甲硼烷浓度为0、1、2、3、4、5、6、7、8、9和10 g/L 时的镀层硬度和镀液沉积速度、电流效率,结果如图1所示。

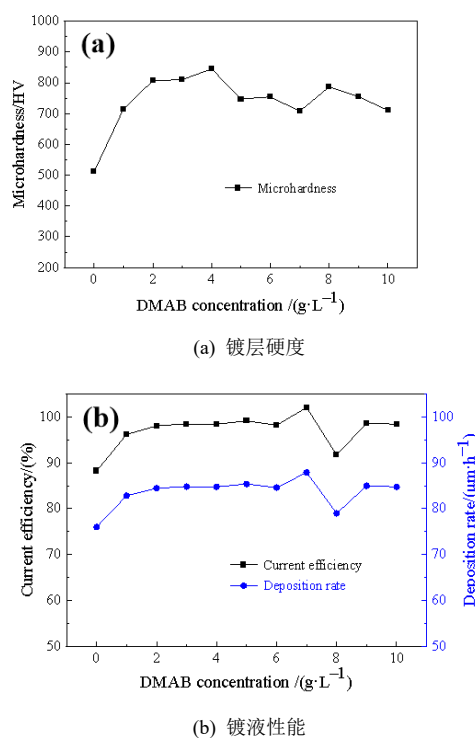


图1 二甲胺基甲硼烷浓度的影响

Fig.1 Effects of dimethylaminoborane concentration

由图1(a)可知,二甲胺基甲硼烷浓度为0时,所获得的Ni-Co镀层硬度较低,仅为511.36 HV,随着二甲胺基甲硼烷浓度的增加,镀层硬度明显提高;当二甲胺基甲硼烷的浓度为4 g/L 时,镀层的硬度达到峰值845.22 HV;浓度超过4 g/L 时,镀液分解加快,稳定性下降,镀层硬度有所下降。由图1(b)可知,二甲胺基甲硼烷浓度在1~6 g/L 时,镀液的沉积速度和电流效率变化较小,原因在于其浓度低时还原能力弱;当二甲胺基甲硼烷浓度提高至8 g/L 时,还原能力提升,沉积速度和电流效率增大;但二甲胺基甲硼烷浓度过高时,镀液稳定性下降,所以镀液的沉积速度和电流效率不升反降。综上,镀液中二甲胺基甲硼烷的最佳浓度为4 g/L 。

2.1.2 复配添加剂对镀液性能的影响

复配添加剂可通过吸附、络合或改变界面过程等方式，调控阴极表面的电结晶行为，从而优化镀层形貌和性能。图2为加入复配添加剂前后Ni-Co-B镀层的宏观和微观形貌照片。加入添加剂前，所获得Ni-Co-B合金镀层呈暗灰色，伴有粗糙感，镀层微观形貌呈现结节状结晶，晶粒尺寸不均匀，表面起伏较大。加入复配添加剂后，镀层表面呈光亮银白色、结晶细致，满足航空零件表面对镀层外观检测的要求。

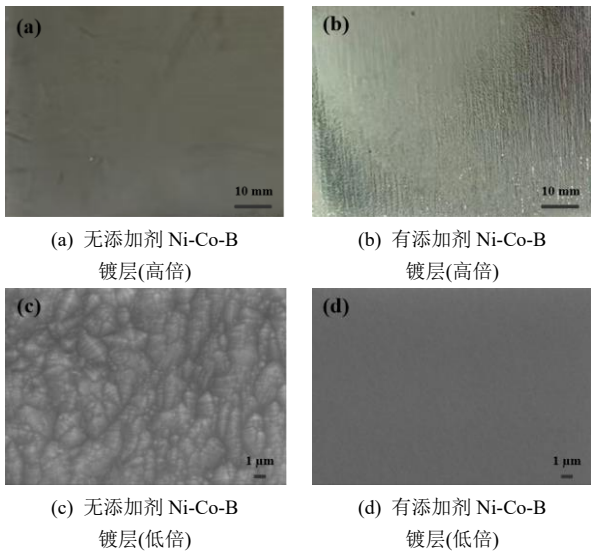


图2 不同镀层的宏观和微观形貌图

Fig.2 Macro and micro morphology of different plating

2.1.3 电流密度对镀层硬度及镀液性能影响

电流密度较低会导致镀层无光泽；电流密度过高则会使镀层粗糙，甚至烧焦。固定硫酸镍120 g/L、硫酸钴12 g/L、氯化镍40 g/L、二甲氨基甲硼烷4 g/L、硼酸35 g/L、复配添加剂2 g/L，温度50 °C，电镀时间30 min，分别测试电流密度1、2、3、4、5、6、7、8、9和10 A·dm⁻²下镀层硬度和镀液沉积速度、电流效率，实验结果如图3所示。

由图3(a)可知，电流密度对镀层的硬度影响较大。随电流密度增加，镀层硬度呈先增后降的趋势，并在7 A·dm⁻²时达到峰值757.58 HV。由图3(b)可知，电流密度对电流效率影响较小，但沉积速度随着电流密度的增加而增加。当电流密度为7 A·dm⁻²时，阴极电流效率达到96.74%、沉积速度为83.32 μm·h⁻¹。综上，确定最佳电流密度为7 A·dm⁻²。

2.1.4 优化后 Ni-Co-B 合金镀层与 Cr⁶⁺ 硬铬层对比

经过系统单因素实验，将镀液组成及工艺参数

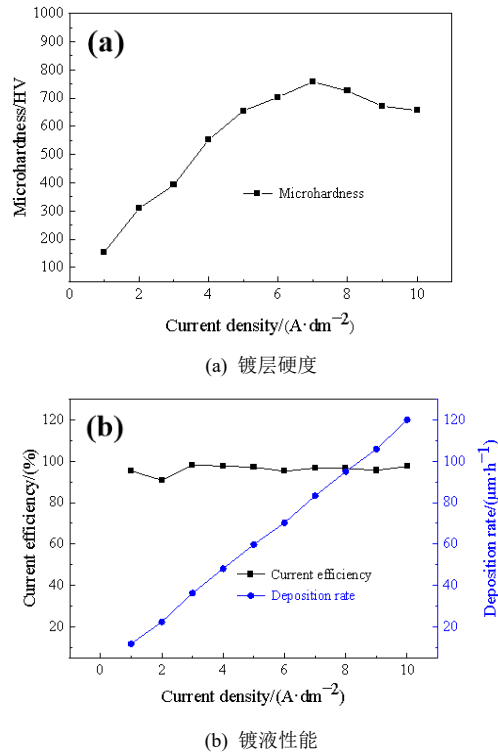


图3 电流密度的影响

Fig.3 Effects of current density

优化为：硫酸镍120 g/L，硫酸钴12 g/L，氯化镍40 g/L，硼酸35 g/L，二甲氨基甲硼烷4 g/L，复配添加剂2 g/L；温度50 °C，电流密度7 A·dm⁻²，pH值4.0。在上述条件下沉积Ni-Co-B合金镀层，并与Cr⁶⁺硬铬层进行对比分析。表2显示了Cr⁶⁺硬铬层与Ni-Co-B合金镀层的均方根粗糙度(R_q)和平均粗糙度(R_a)，结果证明Ni-Co-B合金镀层的R_q和R_a分别降至1.789和0.302 μm，明显低于Cr⁶⁺硬铬层。低粗糙度表面不仅有利于减少摩擦系数与磨损，更能显著减少腐蚀环境中表面活性点，如尖峰、凹谷数量，从而延缓腐蚀介质的吸附与侵蚀进程。

图4为光学显微镜下Cr⁶⁺硬铬层和Ni-Co-B合金镀层的宏观形貌图像与粗糙度图像。图中Cr⁶⁺硬铬层表面有明显裂纹，而Ni-Co-B合金镀层表面均匀细腻无裂纹。在诸多的镀铬件锈蚀原因分析中发现，飞行器在海洋等恶劣环境下服役时，海水、海雾通过镀铬层的微观孔隙和裂纹侵蚀金属基体，导致金属基体锈蚀，镀硬铬层表面出现红色锈蚀产物。为解决镀铬件锈蚀问题，常利用镀硬铬后涂覆封孔剂来提升镀层对基体的防护能力，而Ni-Co-B合金镀层致密无孔隙及裂纹从本质上规避了锈蚀的风险。

表2 硬Cr镀层与Ni-Co-B合金镀层的粗糙度参数

Tab.2 Roughness parameters of hard Cr coatings and Ni-Co-B alloy coatings

试样类别	$R_a/\mu\text{m}$	$R_q/\mu\text{m}$
Cr ⁶⁺ 硬铬层	0.473	3.565
Ni-Co-B 合金镀层	0.302	1.789

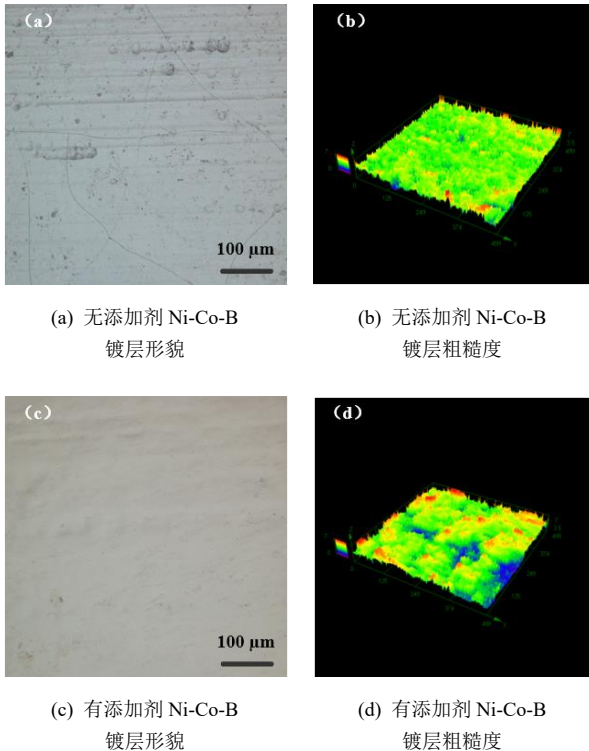


图4 不同镀层的宏观形貌与粗糙度图像

Fig.4 Macro-morphology and roughness images of different coatings

2.2 热处理对镀层性能及结构的影响

2.2.1 热处理温度对硬度的影响

Ni-Co-B合金镀层为非晶或微晶结构。非晶结构属于介稳结构，不耐高温，在加热过程中结构不稳定并易引起原子重排，最终可能形成晶态结构^[26]。为探究Ni-Co-B合金镀层在热处理后硬度的变化，对合金镀层在200、250、300、350和400℃下进行热处理，热处理后Ni-Co-B合金镀层的硬度变化如图5所示。

由图5可知，不同热处理温度下，镀层硬度有不同程度改变，这是由于在热处理过程中晶粒粗化和少量的金属间化合物析出所导致^[27-28]。当热处理温度在300℃以上时，合金表面的晶粒长大，沉淀物

变粗并形成晶界，使镀层的硬度降低^[29]；当热处理温度为250℃时，镀层硬度出现最高值1086.9 HV，与Cr⁶⁺硬铬层相当。

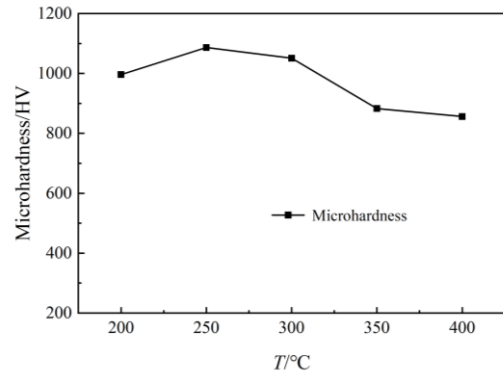


图5 热处理温度对镀层硬度的影响

Fig.5 Effects of heat treatment temperature on coating hardness

2.2.2 热处理对晶体结构的影响

图6为Ni-Co-B合金镀层在250℃条件下热处理前后的X射线衍射图，未经热处理镀层的衍射峰半峰宽较大，根据谢乐公式计算得平均晶粒尺寸约为8.72 nm，为纳米晶结构。热处理后合金镀层的平均晶粒尺寸增大到13.25 nm，且对应于Ni(111)的衍射峰强度增大，峰展宽略微变窄，表明材料发生了再结晶，热处理过程中合金内部析出了细小金属粒子，能够有效地阻碍位错运动，从而大幅提高了合金镀层的硬度。

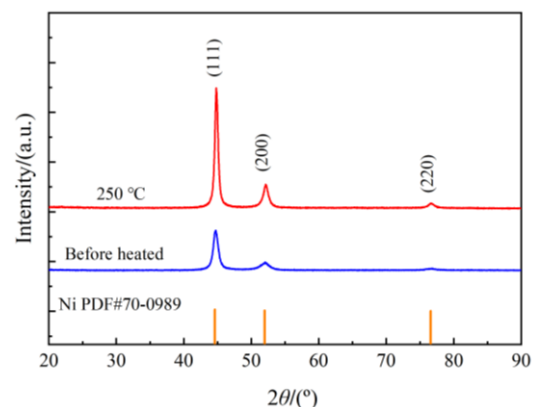


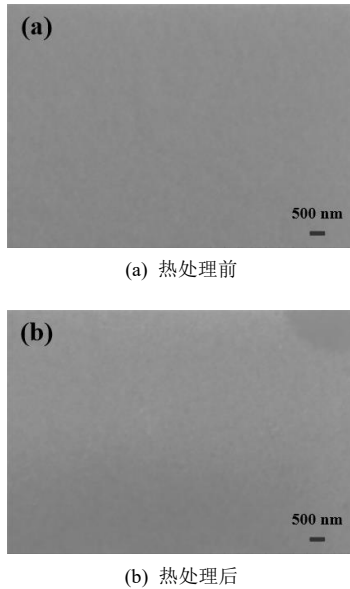
图6 Ni-Co-B合金镀层250℃热处理前后的XRD图

Fig.6 XRD patterns of Ni-Co-B alloy coatings before and after heat treatment at 250 °C

2.2.3 热处理对形貌的影响

对250℃热处理前后的Ni-Co-B合金镀层进行SEM分析，结果如图7所示。热处理前后的Ni-Co-B

合金镀层表面均匀, 不存在明显的结晶颗粒, 未见明显孔隙与微裂纹, 具有高致密性与低粗糙度的特征, 这构成了其优异耐环境适应性的物理基础, 对于在复杂环境中要求长寿命、高可靠性的航空飞行器零件防护极具价值。



(a) 热处理前

(b) 热处理后

图7 Ni-Co-B合金镀层 250 °C 热处理前后的微观形貌

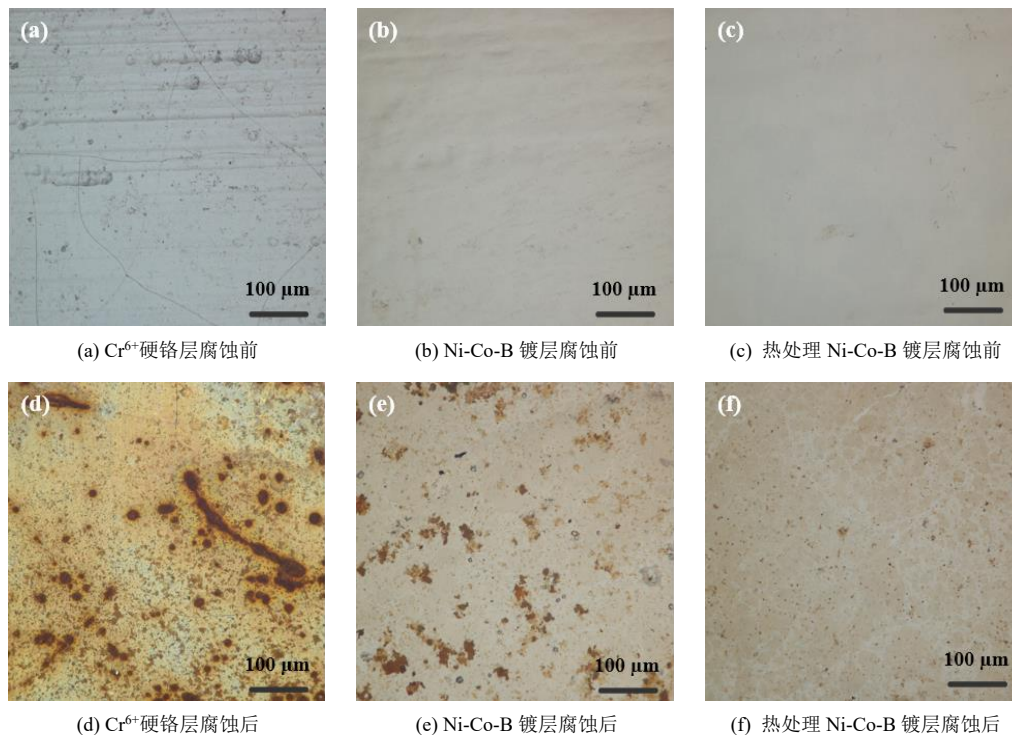
Fig.7 Microstructure of Ni-Co-B alloy coating before and after heat treatment at 250 °C

2.2.4 热处理对耐蚀性的影响

中性盐雾实验中, 经过8 h连续喷雾后, 在Olympus显微镜下观察到的镀层形貌(放大500倍)如图8所示。

Cr⁶⁺ 硬铬层表面在试验后出现了明显的泛黄及局部暗斑, 低倍显微镜下可见稀疏分布的腐蚀点。而未经热处理的Ni-Co-B镀层表面虽仍保持金属光泽, 但已可观察到较多的腐蚀点。经250 °C热处理后的Ni-Co-B镀层表现最为优异, 其表面宏观上几乎保持原貌, 仅出现少量、分散且细小的腐蚀点。结果表明, 热处理显著提升了Ni-Co-B镀层的耐蚀性, 其防护性能优于传统Cr⁶⁺ 硬铬层。

Tafel曲线测试结果如图9所示, 计算得到的腐蚀电势和腐蚀电流密度结果如表3所示。腐蚀电位反映了金属发生氧化的热力学趋势, 腐蚀电流密度反映了腐蚀反应的速率, 从图9及表3中可以看出, 热处理后Ni-Co-B镀层的腐蚀电位有所负移, 但其腐蚀电流密度仍低于硬铬镀层及热处理前的状态, 腐蚀电位的负移可能意味着镀层表面形成一层致密、具有保护性的腐蚀产物膜或吸附层, 极大地抑制了腐蚀速率。综合电化学性能可知, 热处理后的Ni-Co-B镀层的耐蚀性能优于传统Cr⁶⁺ 硬铬层, 与盐雾实验结果相符合。



(a) Cr⁶⁺硬铬层腐蚀前

(b) Ni-Co-B 镀层腐蚀前

(c) 热处理 Ni-Co-B 镀层腐蚀前

(d) Cr⁶⁺硬铬层腐蚀后

(e) Ni-Co-B 镀层腐蚀后

(f) 热处理 Ni-Co-B 镀层腐蚀后

图8 镀层在 3.5% NaCl 溶液中盐雾试验前后形貌图

Fig.8 Morphology of coatings before and after salt spray testing in 3.5% NaCl solution

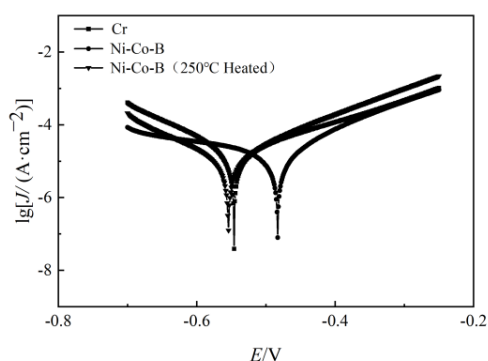


图9 热处理前后 Ni-Co-B 合金镀层的 Tafel 曲线

Fig.9 Tafel curves of Ni-Co-B alloy coatings before and after heat treatment

表3 热处理前后 Ni-Co-B 合金镀层的腐蚀参数

Tab.3 Corrosion parameters of Ni-Co-B alloy coatings before and after heat treatment

镀层	腐蚀电势/ V	腐蚀电流密度/ (A·cm ⁻²)
Cr ⁶⁺ 硬铬层	-0.545 3	2.058×10 ⁻⁵
Ni-Co-B	-0.483 7	1.830×10 ⁻⁵
Ni-Co-B (250 °C heated)	-0.553 7	1.111×10 ⁻⁵

3 结论

本文通过优化Ni-Co-B合金镀液和工艺参数,镀后热处理的方法开展研究验证,明确了一种高硬度Ni-Co-B合金镀层制备工艺,为航空飞行器制造中Cr⁶⁺镀硬铬技术替代提供了参考。在对Ni-Co-B合金镀层的表面结构、形貌和耐蚀性等研究中,得出以下结论:

(1) 较优的电镀Ni-Co-B合金镀液及工艺参数为:硫酸镍120 g/L,氯化镍40 g/L,硫酸钴12 g/L,硼酸35 g/L,二甲胺基甲硼烷4 g/L,复配添加剂2 g/L;温度50 °C,电流密度7 A·dm⁻²。

(2) Ni-Co-B合金镀层外观均匀细致平整无裂纹,粗糙度值明显低于Cr⁶⁺硬铬层。

(3) Ni-Co-B合金镀层硬度为750~800 HV,热处理后硬度可提升至1 000 HV。

(4) 热处理前后Ni-Co-B合金镀层的耐蚀性均优于硬铬镀层;热处理后Ni-Co-B合金镀层耐蚀性提升较为明显。

参考文献

[1] 张俊彦,王立平,薛群基.电沉积替代硬铬抗磨耐蚀功

能防护合金镀层的研究[C]//第六届全国表面工程学术会议.兰州.2006:336-339.

[2] 张景双,屠振密,安茂忠,等.代铬镀层的研究和应用[J].电镀与环保.2001,21(1):4-8.

[3] 王浩军,詹中伟,周雁文,等.新型镀铬封孔技术的性能及其在某型飞机起落架上的应用[J].腐蚀与防护,2019,40(11):816-820,825.

[4] 车晓阳,闫美佳,孙文慧,等.航空零件传统镀硬铬防护技术研究[J].广州化工,2023,51(21):113-114,139.

[5] 祝洪芬.电镀行业六价铬污染的防治[J].山西冶金,2018,41(4):59-61.

[6] 邓正平,田志斌,詹益腾,等.代六价铬电镀现状及趋势[J].电镀与涂饰,2020,39(7):440-443.

[7] 田雨,张政,张兴然,等.三价铬电沉积工艺研究进展[J].无机盐工业,2023,55(12):26-35.

[8] 张鹏飞,梅军云.三价铬硬铬电镀及镀层性能镀层性能研究[J].中国设备工程,2022(14):140-142.

[9] 刘李,张哲晨,靳广虎,等.Ni-P-SiC镀层及其摩擦磨损特性研究[J].金属功能材料,2023,30(5):123-129.

[10] LI Z J, MA F, LI D S, et al. Enhanced mechanical and tribological capabilities of a silicon aluminum alloy with an electroplated Ni-Co-P/Si₃N₄ composite coating[J]. Metals, 2022, 12(1): 120.

[11] 郭忠诚,陈文鹏.Ni-P-SiC化学复合镀的研究及应用[J].材料保护,1991,24(11):15-17.

[12] 王晋春,程旭东,李丹虹,等.Ni-W-SiC纳米复合电镀工艺的研究[J].材料工程,2006,3:25-28.

[13] 周新宇,王一雍,金辉,等.电沉积制备Ni-Co合金镀层的成核过程研究[J].电镀与环保,2019,39(3):13-15.

[14] 杨航城,田海燕.工艺参数对电镀镍钴合金及其性能的影响[J].电镀与精饰,2021,43(4):5-10.

[15] BARRERA P. R., RODRIGUEZ C. E., GOMEZ F. J. R. Comparative assessment of Ni-Co coatings obtained from a deep eutectic solvent, choline chloride-ethylene glycol, and water by electroplating[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2023, 27: 3075-3089.

[16] 舒畅,谢光荣,朱有兰.ABS塑料电镀Ni-W合金[J].电镀与涂饰,2010,29(7):5-8.

[17] 张雅鑫,袁炜,刘圆敬,等.化学镀镍硼镀层的研究进展[J].表面技术,2024,53(14):32-44.

[18] 黄建娜,刘松林.硼氢化钠对滑轮用铸钢板化学镀Ni-B合金薄膜性能的影响[J].电镀与环保,2020,40(2):22-24.

下转 44 页